第38卷 第3期
2021年5月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 3
May 2021

伊犁河谷西部土地植被覆盖演化及驱动力分析

文广超， 赵梅娟， 谢洪波， 张 毅， 张 娟
（河南理工大学，河南 焦作 454000）

摘 要： 为了揭示伊犁河谷西部地区土地植被覆盖演化的驱动因素，选取2001—2016年16景卫星影像数据，基于“3S”技术，运用图像分类、叠加分析、统计分析等方法，分析了研究区土地植被覆盖时空演化规律，应用地理探测器模型定量探究了影响土地植被覆盖演化的主要驱动力。结果表明：(1) 2001—2016年，裸地、草地、林地、耕地占总面积87%，占土地利用类型主导地位，构成区域土地利用基本格局，建设用地持续增加，冰川、沙地及水域面积持续减少；(2) 研究区植被大面积稳定演进，低植被覆盖面积减少约1333 km^2，高植被覆盖等级面积持续增加1020 km^2，植被覆盖由中低等水平向较高和高植被覆盖等级转变；(3) 利用地理探测器识别出研究区土地植被覆盖演化受自然和人类因素共同影响，降雨、气温、人口、GDP及高程为演化的主要因子，部分因子对土地植被变化的差异性显著，出现双因子协同增强现象；(4) 气象要素是区域土地植被覆盖演化的主要驱动因素，人类活动为次要驱动因素。

关键词： 演化；驱动因子；土地利用类型；植被覆盖度；地理探测器；伊犁河谷西部

西北地区地处欧亚大陆腹地，资源丰富，但生态环境基础脆弱，是全球气候变化下最敏感的地区之一[1]，水资源紧缺、土地植被覆盖率低等生态问题长期制约区域经济发展[2]。植被和土地作为生态系统的重要组成部分，能反映区域的基本生态质量，植被不仅能反映土地覆盖的变化，而且是衡量生态环境变化的敏感指示因子[3]，土地利用变化既影响经济水平建设，又对生态环境演化起直接或间接作用，及时了解土地植被覆盖演化对合理开发利用区域资源具有重要意义。伊犁河谷西部地区作为连接中亚“丝绸之路经济带”的桥头堡[4]，其覆盖的森林、冰川等在调节气候、保持水土、维护生态平衡方面具有不可或缺的作用，担负着新疆生态屏障功能[2]，但长期以来本地优势资源的开发利用导致出现植被退化[5]、水域、冰川面积缩减[6]、土地利用类型改变[7]、生态承载压力增大[8]等一系列问题，亟需开展土地植被覆盖调研。

近年来以自然与人类活动共同作用为核心的土地植被覆盖动态变化过程成为相关学者的研究焦点[9-10]，部分学者就西北地区流域生态、土地利用特征及驱动力等方面进行了系统研究[11-12]。“3S”以其空间性、时效性及信息量大等优点，进一步推动了土地利用变化的动态研究，如刘亚文等[13]基于遥感数据，利用GIS等分析方法得出吐鲁番绿洲区时空格局变化受自然与人文社会因素影响。王玉娟等[14]结合遥感与土地利用数据得出影响伊犁河流域生态环境的驱动因子为气候变化与人类活动。王思梦等[15]基于RS和GIS技术结合生态因子——植被、土壤、地形等因子，对无定河生态环境质量的时空变化进行了评价。周亚军等[16]利用遥感影像和景观指数，定量分析了锡林河流域湿地的演变趋势及驱动力，揭示出湿地面积变化与降水量和气温存在一定关系，对人口和羊的数量的响应更为敏感。

目前以植被覆盖及土地利用类型整体变化为指标，定量、定性分析研究区土地植被覆盖演化驱动机制的报告鲜见，因此，本研究基于伊犁河谷西部地区遥感、气象、人口经济等数据，分析其土地植被覆盖的时空演化规律，运用地理探测器模型揭示其演化的驱动因子，为区域经济建设、生态平衡及

收稿日期： 2020-09-22； **修订日期：** 2020-11-06
基金项目： 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室开放基金项目(2014G1502022)；河南省高等学校重点科研项目计划(15A170007)；河南理工大学博士基金项目(B2020-54)
作者简介： 文广超(1979-)，男，博士，副教授，主要从事流域水文过程与生态环境保护、地学信息技术与“3S”集成应用等方面的教学与科研工作. E-mail: wengc366@163.com

资源可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于伊宁盆地西部(图1),地理位置为43.28°~44.85°N,80.17°~82.25°E,高程478~4285 m,面积约15043 km²,行政区划包括伊宁县、察布查尔锡伯自治县、霍城县、伊宁市。研究区为半湿润半干旱温带大陆性气候,受地形条件影响,西风带水汽聚集,降雨充沛。雨季集中在4—7月、10—11月,多年平均降雨量为254~384 mm。研究区气温时空差异显著,1月、7月份分别为年内最低、最高气温,平原气温高于南北部山区,西部气温高于东部。

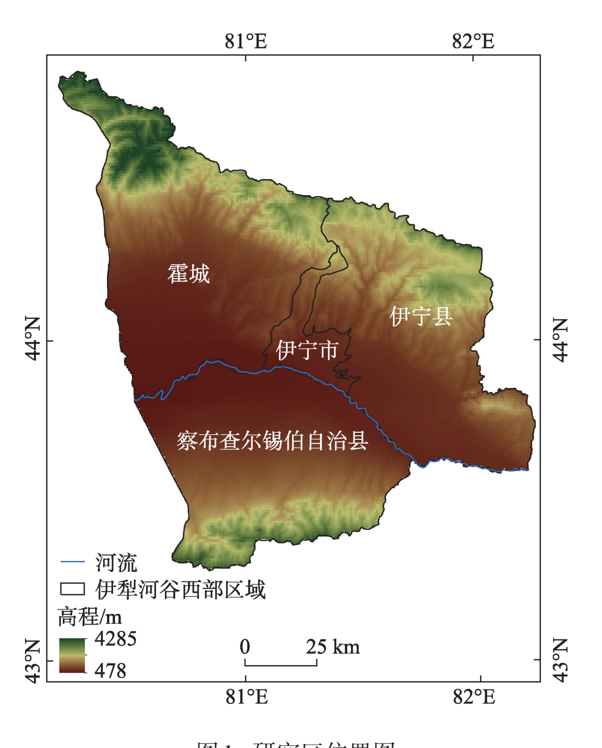


图1 研究区位置图

Fig. 1 Schematic diagram of study area location

1.2 数据来源

数据及其来源如表1所示。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态分析方法 土地利用动态度、土地利用程度变化指数、转移矩阵[17]可反映各类型时空变化趋势,定量表达土地利用程度的总体水平及各类型之间的流转关系。

(1) 土地利用动态度模型

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:K 为研究时段内某一土地利用类型的动态度,$K>0$代表该类型土地面积增加,反之减少;U_a、U_b 代表研究时段初、时段末的面积,T 是研究时间段的长度。

1.3.2 植被覆盖度 本文采用植被指数表征植被生长状态,分析植被覆盖度变化与气象、水文等因子之间的关系[18]。

1.3.3 地理探测器 地理探测器是用于探测空间分异机制背后驱动力的计量模型,通过探测自变量与驱动因子之间的空间分布格局一致性,进而探测两变量可能的因果关系[19],包括因子、交互、生态、风险探测4种模型,可探测定量和定性数据,识别多因子之间的关系[20]。本文主要采用因子、生态、交互探测模型,用 q 值定量分析各因子 X 对演化的贡献力。

(1) 因子探测模型

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{l} n_h \sigma_h^2}{n\sigma^2} \quad (2)$$

式中:q 表示因子对生态效率的解释力,h 为因子 X 的分层;n_h、n、σ_h^2、σ^2 分别为次级区域和整个区域的个数、方差。q 值域为[0,1],数值越大表明因子

表1 数据来源

Tab. 1 Data source

数据名称	数据来源	空间分辨率	时间分辨率	备注
Landsat数据	美国地质调查局(http://earthexplorer.usgs.gov/)	30 m×30 m	16 d	2001、2006、2011、2016年8—9月共16景
DEM数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)	90 m	16 d	若干幅DEM数据
气象数据	中国气象数据分享平台(http://www.cma.gov.cn/)	–	–	2001—2016年逐月气象数据
人口、经济等数据	《伊犁哈萨克自治州统计年鉴》	–	1 a	2001—2016年
水文地质数据	伊犁河谷西部平原区1:50000水文地质调查实施方案	–	–	2018年
验证数据	中国地质调查局西安地质调查中心	–	5 a	1:100000土地利用标准分类图

对植被覆盖及土地利用的解释力越强[19]。

(2) 交互探测用于识别两个因子之间的交互作用,探测存在的关系包括双因子协同增强、非线性增强、非线性减弱、单因子拮抗、独立[21]。

(3) 生态探测。利用F统计量分析风险因子$X1$和$X2$(及更多X)是否对变量Y产生交互影响,即是否存在显著差异,若存在记为“Y”,否则为“N”[21]。

2　结果与分析

2.1　土地利用分类的时空变化规律

参考《土地利用现状分类》(GB/T 21010-2017),将土地利用类型分类(图2),经验证总体精度大于85%。由结果可知,2001—2016年裸地、草地、林地和耕地占总面积87%,构成区域土地利用基本格局。

裸地分布在伊犁河谷人工绿洲至山麓的砾质平原区,2001—2006年,冰川、水域流入裸地,其面积由3141 km^{2}增至3212 km^2,之后减少1315 km^2,主要流转为草地、耕地和建设用地。草地分布在山地、荒漠草原,2001—2011年面积减少423 km^2,主要转为林地,之后5 a间,冰川、水体、耕地等转入,面积增加397 km^2。林地主要分布在伊犁河河漫滩、乌孙山等山区,在自然和人类因素共同作用下,16 a来草地、水体、冰川和耕地转入,林地整体增加337

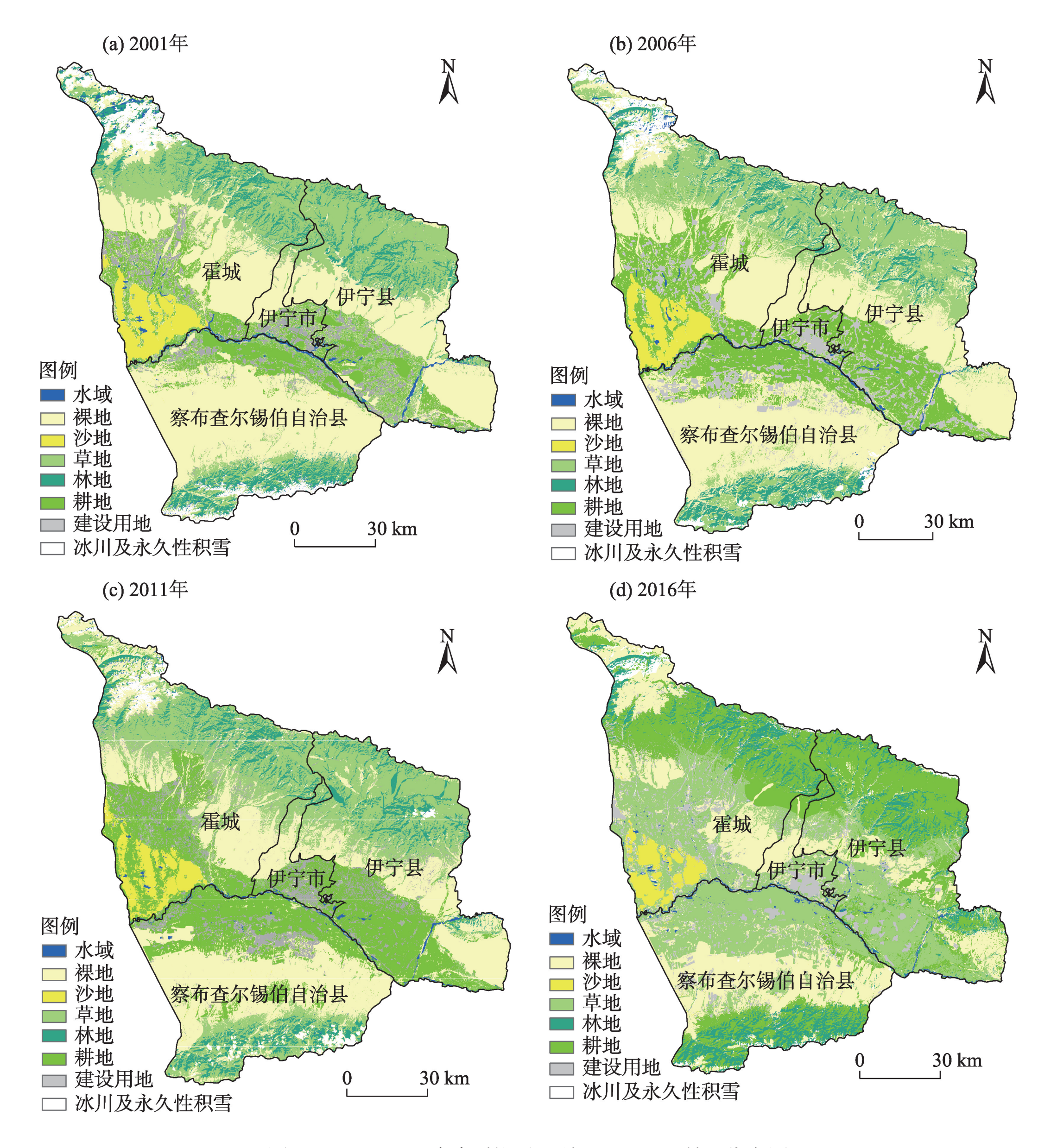


图2　2001—2016年伊犁河谷西部地区土地利用分类图

Fig. 2　Landuse classified map in the western part of Ili Valley from2001-2016

km^2。耕地主要分布在伊犁河谷第一、二阶地，人工绿洲边缘向外扩张，察布查尔县南部农耕区较为突出，16 a间林地、裸地等整体转入大于转出，其面积由1149 km^2增加到2347 km^2，但转出分散，主要为林地、草地和建设用地等。

建设用地分布在平原区，城镇建设群以研究区为中心呈团块状扩张，居民点自然村以聚落形态呈团、带状扩张，2001—2016年，由于裸地、林地等转入，面积增加283 km^2。冰川分布在霍城县西北部海拔2600 m以上的科古琴山南坡，16 a间面积减少了264 km^2，退化后的冰川大多转变为裸地、草地。沙地分布在霍城县西南部及67团以西区域，与耕地相互转换，总面积减小约249 km^2。水域所占比例最小，包含河谷南北两侧的季节性冰雪融水的山沟水系，地下水的最低排泄带伊犁河及跃进水库、吉林水库等人工水域，16 a来由108 km^2减少至72 km^2，主要转出为裸地、林地和草地。

由表2可知，2001—2016年伊犁河谷西部地区单一动态度变化较大的是水域、冰川、耕地与建设用地。水域、冰川动态度负值增大，表明该时间段内面积加速减少。研究区内城市化与绿洲化进程加速推进，耕地与建设用地整体处于增长阶段。根据土地利用程度综合指数(I)可知(2001—2016年分别为1.9、1.91、2.0、2.1)，I值大于0，与时间呈正相关线性关系，说明土地利用一直处于发展期。从土地利用程度变化指数(3个阶段变化指数分别为3.8%、9.1%、10.5%)可以得出，2001—2011年间土地利用处于加速发展时期，2011—2016年发展较缓慢。建设用地和耕地的变化是土地利用综合指数变化的主要来源，进一步证明人类活动强烈。

2.2 植被覆盖时空变化

基于时间尺度，伊犁河谷西部地区4期植被覆盖度逐年增高，均值分别为0.46、0.47、0.52、0.54(图3)。由植被覆盖度分级可知(表3)，其中低、较低植被覆盖分布在霍城县西北部科古琴山脊的沏巴热尔恰、开干巴斯他乌，阿吾拉勒山南麓洪积扇群及砾质荒漠区，察布查尔县境内乌孙山北麓的洪积扇群，霍城县境内霍尔果斯沙漠、六十三团沙漠等，以及河谷平原区的城镇建设区，区内地势开阔，多垅沙丘地形起伏不平，岩性由砂岩、砾岩、泥岩及平原细土等组成，地表植被多为超旱生、短生类沙漠植被群落及少量人工植被，近16 a来研究区低、较低植被覆盖面积分别减少约1333 km^2、561 km^2。

2001—2016年中、较高、高植被覆盖面积分别增加约为735 km^2、139 km^2、1020 km^2。中度、较高、高等植被覆盖区域分布在伊犁河两侧的冲积平原区、含砾细土平原区、河谷中部农耕区与科古琴山、乌孙山山区地带等，区内岩性以砂、砂砾石夹薄层砂或粉土等为主，土质肥沃，排灌条件良好。

植被覆盖整体处于稳定-明显增加阶段，较低、中度及较高植被覆盖等级呈浮动变化，区内植被覆盖呈现以低植被减少及高植被增加为主的转变趋势，植被覆盖等级由低、中度向较高等级转换。

2.3 不同土地利用类型的植被覆盖变化规律

不同土地利用类型的植被覆盖度存在差异，由图4知，各土地利用类型的植被覆盖度排序为林地>耕地>草地>建设用地>裸地>沙地>水域>冰川。根据表4知，研究区植被覆盖等级在大面积稳定的基础状态下进行演进，植被覆盖度增加区域明显高于减少区域。

由图4看出，近16 a来，耕地、草地、沙地植被覆盖度整体呈上升趋势，林地植被覆盖度整体呈弱上升趋势，建设用地、冰川、水域植被覆盖度显著下降，裸地植被覆盖度呈弱下降趋势。植被覆盖度的增高，一方面得益于气候条件向暖湿化发展，另一方面在于伊犁州开发与治理相结合，伊犁河谷西部地区河滨湿地次生林纳入中央森林生态效益补偿，察布查尔县创建生态旅游与扶贫开发、改善民生相结合模式的综合开发示范园区[22]，山区“封山育林”、“退耕还林还草”及“草原限牧”等生态保护政

表2 2001—2016年土地类利用型动态度

Tab. 2 Dynamic degree of landuse types in 2001-2016

时间段	土地类利用型							
	水域/%	裸地/%	沙地/%	冰川/%	建设用地/%	草地/%	林地/%	耕地/%
2001—2006	-1.76	0.45	-5.04	-2.60	1.26	-3.18	0.72	4.94
2006—2011	-1.53	-4.70	-1.36	-3.27	0.92	-0.75	1.53	5.83
2011—2016	-4.02	-4.55	-0.89	-4.29	5.27	4.42	-1.13	5.35

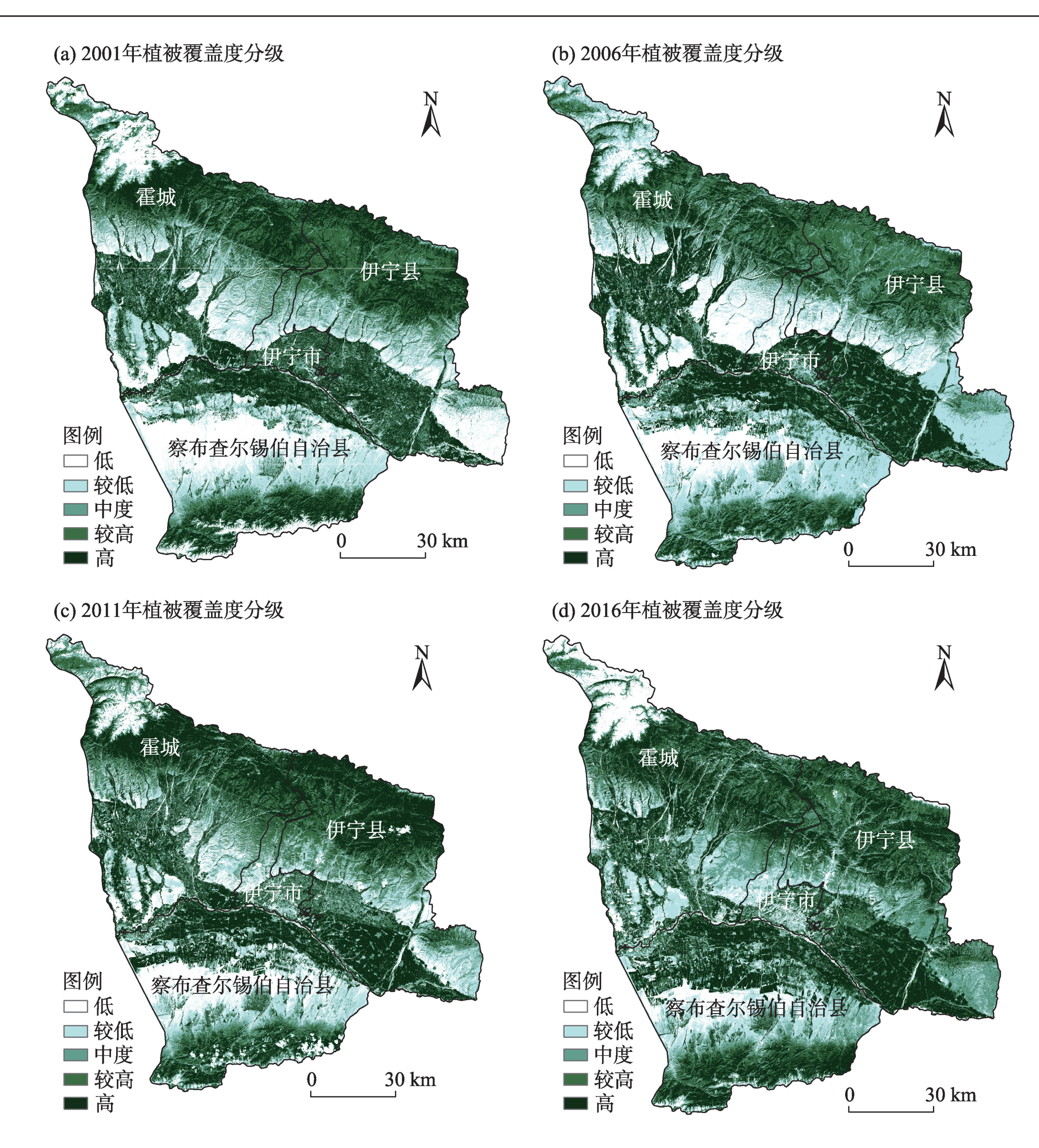


图3 2001—2016年植被覆盖度分级

Fig. 3 The grade of vegetation coverage from 2001 to 2016

表3 2001—2016年植被覆盖度分级

Tab. 3 Vegetation coverage grade data from 2001 to 2016

年份	植被覆盖度分级				
	低/%	较低/%	中度/%	较高/%	高/%
2001年	19.13	18.47	13.13	20.45	28.82
2006年	16.05	20.64	15.23	19.85	28.23
2011年	14.83	16.20	14.40	18.98	35.59
2016年	10.27	14.74	18.02	21.37	35.60
2001—2016年	15.07	17.51	15.20	20.16	32.06

策的落实[23-24]。人类活动对研究区耕地植被覆盖度影响较直接,2001—2016年,耕地面积增加1198 km^2,人工绿洲与耕地植被覆盖度明显上升,冰川、水域等植被覆盖度相对减少。

3 土地植被覆盖度演化的驱动因素

3.1 气象因子

由图5可知,2001—2016年研究区年均气温总体呈波动上升趋势,年均降雨量整体呈上升趋势。研究区气温变化与伊犁河谷气温变化趋势一致,伊犁河谷气温在1960—2014年呈显著增加趋势,气温增长率达0.04 ℃·a^{-1}[4]。研究区温度波动上升,冰雪覆盖面积在2001—2016年持续减小,减小率达47.2 $km^2·a^{-1}$,气温上升加剧地表水及土壤水蒸发,冰雪消融,雪线上移,短时间促进农牧业发展。研究区降雨趋势同步于伊犁河谷,伊犁河谷降雨量在1960—2014

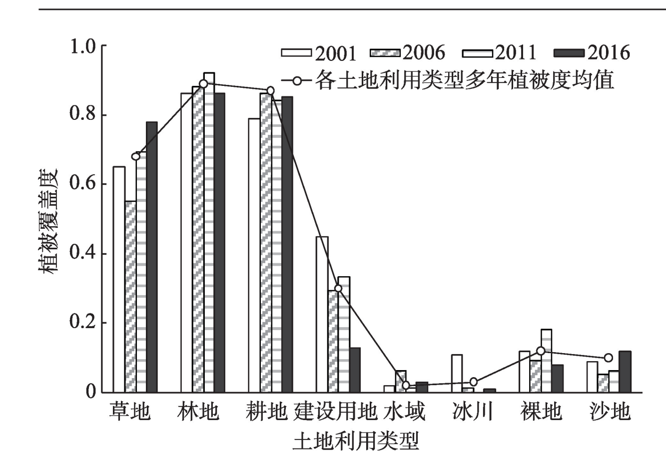


图4 土地利用类型与多年植被覆盖度均值的关系

Fig. 4 The relationship between landuse types and mean annual vegetation coverage

表4 2001—2016年植被覆盖度变化类型

Tab. 4 Statistics of variation types of vegetation coverage from 2001 to 2016

植被覆盖度变化	面积/km²	占比/%	主要土地利用类型
显著减少	725.07	4.82	水域、冰川、建设用地的中高植被
减少	1766.05	11.74	水域、裸地、稀疏草地、林地
稳定	6602.37	43.89	建设用地、耕地、中高草地
增加	3329.02	22.13	耕地、草地、林地、建设用地低植被
明显增加	2620.49	17.42	耕地、林地

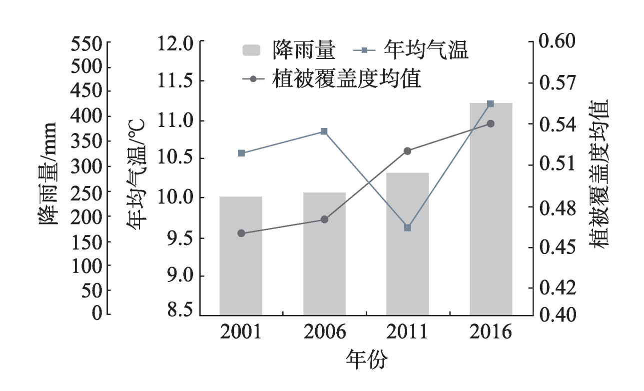


图5 2001—2016年降水量、气温与植被覆盖度变化

Fig. 5 Changes of precipitation, temperature and vegetation cover in the study area from 2001 to 2016

年呈缓慢增加趋势,降水增长率为1.12 mm·a^{-1}[4]。选取受人为因素干扰较小的荒漠和山地地区,比较植被覆盖情况,结果表明荒漠、山区的高植被覆盖度的面积持续增加,降雨量增加促进干旱少雨地区植被生长,天然植被覆盖等级得以提升。

据图5可知,2001—2006年、2011—2016年两个时段,雨热同期,气温升高降雨量增加;2006—2011年,降雨量增加而气温下降,植被生长水热条件相对前两个时段较差,但对比16 a来植被覆盖度呈逐年上升的趋势可知,研究区植被覆盖度变化对降雨量的响应更加敏感。

3.2 地形地貌因子

3.2.1 高程 以50 m为阈值进行分割统计得到图6。研究区内植被覆盖对高程的响应具有明显的空间异质性,植被覆盖随着高程的增加呈波动变化。高程在478～700 m、900～2150 m范围内,植被覆盖度随着高程的增加显著上升,高程大于700～900 m和2150 m范围内,植被覆盖度随着高程的增加而逐渐降低。

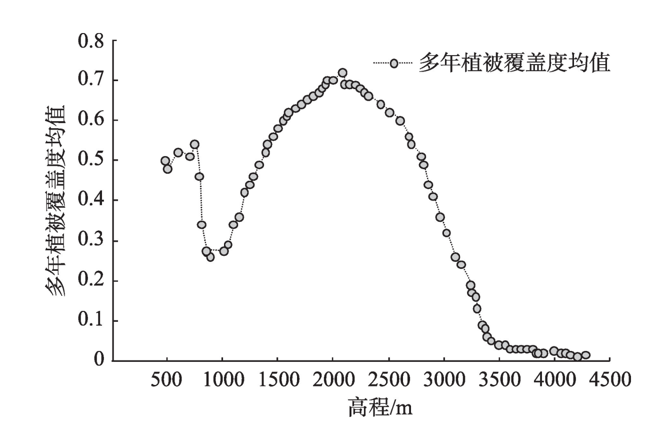


图6 多年植被覆盖度均值与高程关系

Fig. 6 Relationship between mean vegetation cover and elevation

3.2.2 坡度 参照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),得到坡度分级图(图7)。

根据表5可知,植被覆盖度随坡度等级的提升,呈现先增加后减小的趋势。研究区内坡度<5°为荒漠生态系统、人工绿洲生态系统和水体湿地生态系统,为地下水径流、蒸发和排泄区,地形平缓,植被覆盖度受水分和人类活动影响较为强烈。坡度5°～15°为河谷南北两岸山地生态系统,地表起伏增大,植被生长水热条件较好,植被覆盖度较高。坡度在15°～45°,植被覆盖度随着坡度等级的提升而缓慢下降。坡度大于45°,由于自然条件限制,植被覆盖度最小。

3.2.3 地貌 研究区较高至高植被覆盖分布在圆顶低山、浅切割缓顶中山和深切割尖顶中高山以及冲洪积细土平原,区内土壤厚度增加,土质逐渐肥沃,地下水位埋深浅,沿河流两岸盐渍化以外区域自然

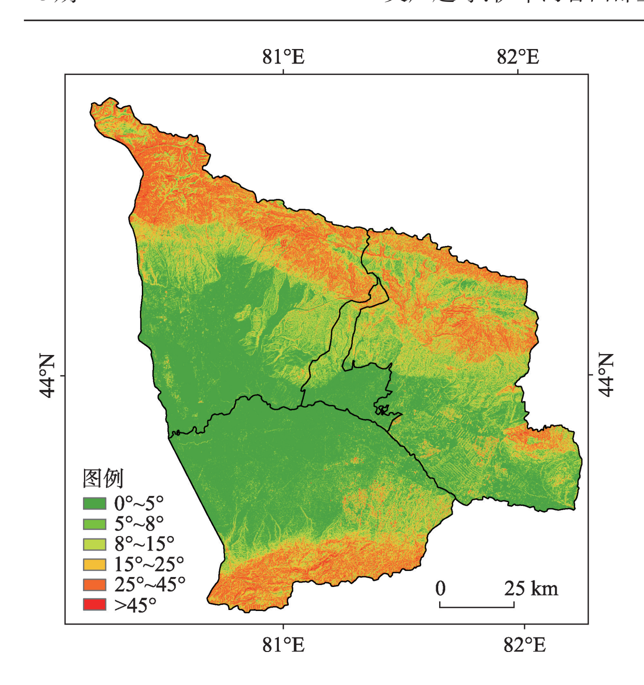


图7 研究区坡度分级

Fig. 7 Gradation of slope in research area

表5 植被覆盖度与坡度的关系

Tab. 5 Relationship between vegetation cover and slope

坡度范围	植被覆盖度均值	面积占比/%
0° ~ 5°	0.29	43.46
5° ~ 8°	0.37	12.24
8° ~ 15°	0.47	16.72
15° ~ 25°	0.43	13.90
25° ~ 45°	0.42	13.24
＞45°	0.40	0.44

植被长势较好,农耕区人为引渠和地下水灌溉,植被覆盖处于较高至高水平。中度植被覆盖分布在垄岗状低山丘陵及缓倾斜的含砾细土平原,区内冲沟发育,水热条件好,植被群落多样且植被覆盖处于中高至较高水平。较低至低植被覆盖分布在冰川发育的极高山、冰蚀作用强烈的高山、山前黄土丘陵、强倾斜的砾质平原及风成沙丘,区内土壤含水率低,蒸发强烈,植被覆盖度低,受全球气温变暖的影响,冰川减少,植被面积增加,但多年植被覆盖均值仍为区内最低(图8)。

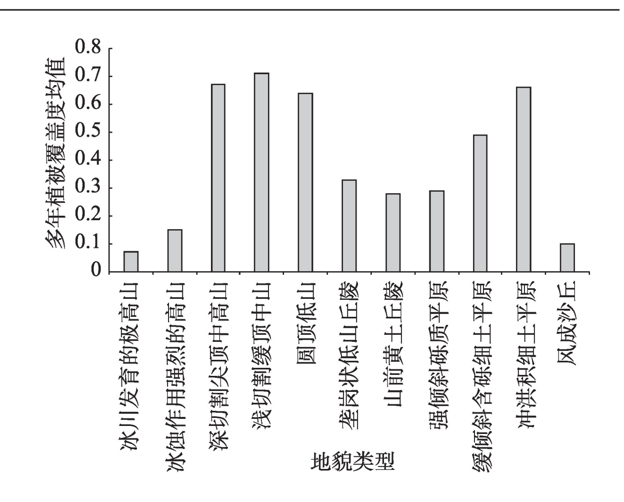


图8 多年植被覆盖度均值与地貌类型关系

Fig. 8 Relationship between mean value of vegetation cover and geomorphic types

3.3 水位埋深

由于人为引井、渠水灌溉的原因,人工植被的生长受地下水位埋深影响较小,因此,本文选取受人为因素干扰较小的生态重点保护区的河道两侧研究。由表6可知,按照植被覆盖度大小总体分三个阈值:首先水位埋深在0~2 m的湿地、沼泽以及农业绿洲,植被覆盖度均值为0.7~0.9;其次2~7 m水位埋深区间内的半荒漠、沙漠等,植被覆盖度均值为0.2~0.3;最后为大于7 m的荒漠地区,植被覆盖度为区域内最小,小于0.05。自然生态区内的河道水位埋深小于5 m,为适宜生态水位,主要植被类型为乔木、灌木和草本植物等,河道水资源丰富,水位埋深相对较浅,植被生长条件良好,植被覆盖度值高达0.8~0.9。整体上,伊犁河谷西部地区植被覆盖度随地下水埋深的增加而减小。

3.4 人类活动

自2001—2016年,研究区总人口与生产总值整体呈连续增长趋势(图9)。近16 a间,总人口由123.03×10^4人增加到156×10^4人,增长率为21%,此外,旅游业等第三产业的迅猛发展,研究区的生产总值由2001年的45.2×10^8元增长至2016年的432.8×10^8元,增长率高达90%,其中第三产业增长

表6 植被区划、覆盖度与水位埋深的关系

Tab. 6 The relationship between regionalization of vegetation types, the cover and groundwater depth

水位埋深/m	植被覆盖度	区域划分	植被代表类型
0~2	0.7~0.9	人工生态区农业绿洲;自然生态区沼泽、湿地	玉米、小麦等;野蔷薇、沙棘等灌木;芦苇、芦草等
2~7	0.2~0.4	自然生态区半荒漠、沙漠、盐碱滩地	梭梭、沙拐枣等;白刺、白梭梭、沙蓬;盐蒿、盐角草、碱柴等
＞7	<0.05	自然生态区荒漠	梭梭、红柳、琵琶柴等

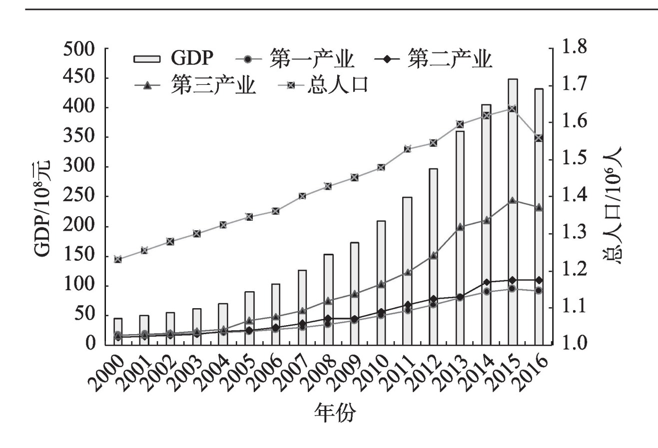


图9 研究区人口、GDP和产业结构变化

Fig. 9 Changes of population, GDP and industrial structure in the study area

1370%，说明经济和农业水平的不断提高，人们生产方式发生转变，劳动力转移，经济来源方式及生态保护意识发生改变，同时政府实施生态环境保护建设相关措施也在不同程度上影响着土地利用格局的演变。

根据相关性分析可知，植被覆盖度均值和GDP、人口呈强相关性，相关系数为0.73、0.76，说明植被覆盖度对人口数量比GDP的响应更敏感。近16 a研究区植被覆盖整体稳定，但县市中心植被呈放射状退化，乡镇、公路干线及水利建设沿线植被退化较为显著。耕地和城镇扩张，促进了绿洲经济发展，但增加用水需求量，挤占生态用水，人类活动加快了研究区的植被覆盖演化。

3.5 土地植被覆盖时空分异的驱动因素探测

为确定不同因子贡献率，利用地理探测器分析了上述因子对变量的影响力，结果表明：

（1）不同因子对植被盖度的影响度排序为：*X1*年降雨量（0.542）＞*X7*人口（0.506）＞*X2*年均气温（0.451）＞*X8* GDP（0.414）＞*X3*高程（0.368）＞*X5*地貌（0.337）＞*X6*水位埋深（0.232）＞*X4*坡度（0.120），说明降雨及人口是影响植被盖度的关键因子，其次是气温、GDP。

（2）不同因子对土地利用类型的影响度排序为：*X1*年降雨（0.523）＞*X2*年均气温（0.465）＞*X7*人口（0.427）＞*X8* GDP（0.398）＞*X3*高程（0.37）＞*X5*地貌（0.31）＞*X6*水位埋深（0.284）＞*X4*坡度（0.165），说明降雨是影响土地利用类型变化的主要驱动因子，其次是人口密度及GDP。

根据生态探测结果（表7），研究区降雨与其他

表7 植被覆盖度和土地利用类型的生态探测器分析结果

Tab. 7 Analysis results of ecological detectors for vegetation coverage and land use types

生境因子	*X1*	*X2*	*X3*	*X4*	*X5*	*X6*	*X7*
X1							
X2	N						
X3	Y	Y					
X4	Y	N	N				
X5	Y	Y	Y	Y			
X6	Y	N	N	N	Y		
X7	Y	N	N	N	N	Y	
X8	Y	N	N	N	N	Y	Y

因子（除气温外）对植被覆盖及土地利用类型的空间分布有显著差异，地貌类型与气候和地形因素具有显著性差异，水位变化与人口及GDP变化有显著差异，高程和GDP对植被覆盖影响较大同时受其他因子影响，其余因子之间无显著差异。结合分异及因子探测结果得知，气象、人类活动及高程与研究区土地植被覆盖演化具有显著的相关性。

根据交互探测，选取主导因子交互作用结果如表8，得出因子之间存在显著的双协同增强作用，降雨、人口变化对研究区的土地植被覆盖空间分布及演化的影响强于其他因子。较明显的是，所有因子与降雨交互探测后，都存在增强效应，表明降雨作为长时间序列土地植被覆盖演化的驱动力。

表8 主导因子交互作用及关系分析

Tab. 8 Analysis of interaction and relationship of leading factors

X∩*Y*	*q*(*X*∩*Y*)植被	*q*(*X*∩*Y*)土地	交互关系
降雨∩水位埋深	0.628	0.593	双因子协同增强
降雨∩地貌	0.546	0.552	双因子协同增强
气温∩人口	0.498	0.537	双因子协同增强
高程∩坡度	0.473	0.483	双因子协同增强
气温∩GDP	0.451	0.445	双因子协同增强
人口∩高程	0.424	0.416	双因子协同增强

综上，气象及人类活动因子是影响土地植被覆盖演化的主要因子。人类活动对演化影响较直接，该作用受气象、人口、经济、高程等因子影响存在差异。究其原因，人类主要分布在低海拔地区，该区域以建筑用地、耕地等为主要土地利用类型，植被以中低植被类型为主。地势高的区域，人类活动相对较少，主要以草地、林地等中高植被类型为主，气

象与人类因素在高程起伏区域引起的土地植被覆盖变化存在空间差异。综上,降雨、气温、人口、GDP与高程为影响研究区土地植被覆盖演化的主要因子。

4 讨 论

从上述研究可知,伊犁河谷西部地区土地植被覆盖演化的主要驱动力为气象和人类活动,其中自然气候是土地利用类型与植被覆盖演化的根本条件,人类活动为推动此演化在短时间内快速改变的直接因素[25]。研究区气候温暖湿润,光热充足,气象因素控制着整体的水热资源,影响土地利用的基本格局,地貌形态不但决定了植被覆盖的基本水平,而且影响着土地环境的演化,马艳[26]在伊犁河谷西部地区研究中得到过类似结论。此外,研究区降雨量持续增加,气温波动式升高,植被生长水热条件良好,气候向暖湿化方向发展,气温上升加剧水分蒸发、冰雪消融[27],雪线上移,短时间为研究区提供大量灌溉、饮用和生活水源,但长时间减少固体补给水源,影响演化方向。土地利用格局转变和植被覆盖变化的影响因素是相互交叉作用的结果,具有复杂性及复合性,流域内土地覆被的演化不仅与人口有关而且与流域内的产业结构、人类意识、政府政策等紧密相关,谢余初等[27]在调查金塔绿洲变化驱动力时得到过类似结论。

2001—2005年,受区域气候变化与经济利益的影响,草地面积减少353 km^2,草地-耕地的空间变化主要集中在察布查尔自治县一带,这与李万年等[28]在伊犁河谷土地利用动态研究中的结果一致。此外,人口增长同时,牲畜量由1998年的2.11×10^{6}头增长到2016年的2.39×10^{6}头[4],草料需求增多,草地载畜量上升,在一定程度上加剧对草原和放牧场的采食破坏,长期过度放牧是导致草地退化的主要原因,但退化速度在2010—2015年明显减缓[29],2011年之后,裸地、耕地等转入,草地呈增长趋势,一方面由于气候条件良好,另一方面在于2011年初,伊犁河谷借助国家全面实施草原生态保护补助奖励政策,把2.933×10^5 hm^{2}退化严重的草原和水土涵养区划定为禁牧区,并为2.287×10^6 hm^{2}草场核定了合理载畜量,禁牧和限牧区占河谷草原总面积的九成[30]。16 a来,土地利用各类型之间相互转换,较突出的是耕地和建设用地剧增[31],草地、裸地等贡献较大,土地利用整体呈发展趋势,植被覆盖整体呈增长趋势,研究区土地植被覆盖趋于正向演化。

本文受时间和影像精度影响,在分析土地利用类型方面等有所欠缺,选取指标因子较少,今后的研究中应综合选取多驱动因子定量探讨其对土地覆被演化的影响。

5 结 论

(1) 16 a来,伊犁河谷西部地区土地利用类型变化轨迹均处于一个交替扩张和缩减的发展过程,裸地、沙地、草地、冰川、水域面积减少,林地、耕地、建筑用地面积增加;耕地、建筑用地多由裸地改造,林地、裸地、草地、沙地之间互相转化,土地利用处于发展期——先快速后缓慢发展。

(2) 研究区植被覆盖由中、低等水平向较高等水平转变,植被覆盖度增加多于减少区域,但人类活动主导的城市生态区,由于城镇化等人类活动的加快,植被覆盖整体处于减少阶段。

(3) 地理探测器结果表明,研究区的土地覆被变化主要受自然和人为因素共同影响,土地利用和植被覆盖的演化对降雨响应敏感,其次分别是气温、人口、GDP与高程。

(4) 整体上伊犁河谷西部地区土地植被覆盖演化过程复杂,受自然和人为因素共同影响。气象因素在时空尺度上控制着研究区的水热资源,土地植被覆盖对降雨量的响应较为敏感,降雨是区域长时间序列土地覆被演化的主要驱动力;人类开发程度增大,耕地与建设用地面积增加,人工绿洲不断扩大,加剧演化过程,人类活动是研究区在小范围小时间尺度上土地覆被演化的直接驱动力。

参考文献(References):

[1] 姚昆, 张存杰, 何磊, 等. 川西北高原区生态环境脆弱性评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 349-355, 362. [Yaokun, Zhang Cunjie, Helei, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability in the northwest plateau area of Sichuan [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 349-355, 362.]

[2] 赵鹏, 陈桃, 王茜, 等. 气候变化和人类活动对新疆草地生态系

统NPP影响的定量分析[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 51−62. [Zhaopeng, Chentao, Wangqian, et al. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on grassland ecosystem NPP in Xinjiang[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(1): 51−62.]

[3] 加尔肯居马肯·爱特, 朱海涌. 伊犁河谷生态功能区划探讨[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(4): 140−146. [Jarkhen Jumakhen Aite, Zhu Haiyong. Discussion of ecological function division of Ili River Valley[J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(4): 140−146.]

[4] 伊犁州统计局. 伊犁哈萨克自治州统计年鉴(1999—2017年)[M]. 奎屯市: 伊犁人民出版社, 2018. [Ili Bureau of Statistics. Ili Kazakh Autonomous Prefecture Statistical Yearbook (1999−2017)[M]. Kuytun: Ili People's Publishing House, 2018.]

[5] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提, 孙慧兰, 等. 伊犁河流域土壤盐分与地下水关系的关联分析[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 561−566. [Mamattursun Eziz, Hamid Yimit, Sun Huilan, et al. Correlation analysis on correlation between soil salinity and groundwater in Ili River Basin[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44 (3): 561−566.]

[6] 加尔肯居马肯·爱特, 王文杰, 朱海涌, 等. 基于RS-GIS伊犁河谷土地利用-土地覆盖变化研究[J]. 中国环境监测, 2009, 25(2): 69−72. [Jarkhen Jumakhen Aite, Wang Wenjie, Zhu Haiyong, et al. Investigation of land use/land cover of Ili River Valley based on RS-GIS[J]. Environmental Monitoring in China, 2009, 25(2): 69−72.]

[7] 汪洋, 靳瑰丽, 李卫红, 等. 伊犁河谷土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 151−155. [Wang Yang, Jin Guli, Li Weihong, et al. The spatial coupling of land use/cover change and its environmental effects on Ili Valley[J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(2): 151−155.]

[8] 陈晨, 张哲, 王文杰, 等. 基于GIS的伊犁河谷地区生态承载力研究[J]. 环境工程技术学报, 2013, 6(3): 532−539. [Chen Chen, Zhang Zhe, Wang Wenjie, et al. Study on Ili River Valley area ecological carrying capacity based on GIS [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 6(3): 532−539.]

[9] 许茜, 李奇, 陈懂懂, 等. 近40 a三江源地区土地利用变化动态分析及预测[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 695−704. [Xuqian, Liqi, Chen Dongdong, et al. Land use change in the three-river headwaters in recent 40 years[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 695−704.]

[10] 刘吉平, 赵丹丹, 田学智, 等. 1954—2010年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3234−3244. [Liu Jiping, Zhao Dandan, Tian Xuezhi, et al. Landscape pattern dynamics and driving forces analysis in the Sanjiang Plain from 1954 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3234−3244.]

[11] 阿依努·吐逊, 张青青, 徐海量, 等. 近57 a玛纳斯河流域土地利用/覆被变化[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 599−605. [Ayinu Tuxun, Zhang Qingqing, Xu Hailiang, et al. Land use/cover change in Manas River Basin in recent 57 years[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 599−605.]

[12] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238−247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqing, Chen Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238−247.]

[13] 刘亚文, 阿不都沙拉木·加拉力丁, 阿拉努尔·艾尼娃尔, 等. 1989—2016年吐鲁番高昌区绿洲时空格局变化及其驱动因素[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 945−953. [Liu Yawen, Abdushalam Jalaliding, Alanuer Aniwaer, et al. Spatiotemporal change of the oasis in Gaochang, Turpan and its driving factors during the period of 1989−2016[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 945−953.]

[14] 王玉娟, 国冬梅. 中哈界河伊犁河流域生态环境演变及其驱动力[J]. 欧亚经济, 2016, 21(4): 100−107. [Wang Yujuan, Guo Dongmei. Ecological environment evolution and its driving forces in Ili River Basin, the border river between China and Kazakhstan [J]. Journal of Eurasian Economy, 2016, 21(4): 100−107.]

[15] 王思梦, 黄昌. 基于遥感和GIS的流域自然生态环境质量监测与评价——以无定河流域为例[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 134−141. [Wang Simeng, Huang Chang. Ecological environment quality monitoring and evaluation based on remote sensing and GIS techniques: A case of Wuding River Basin[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 134−141.]

[16] 周亚军, 刘廷玺, 段利民, 等. 锡林河流域上游河谷湿地景观格局演变及其驱动力[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 580−590. [Zhou Yajun, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Driving force analysis and landscape pattern evolution in the upstream valley of Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 580−590.]

[17] 邬亚娟, 刘廷玺, 童新, 等. 基于长时间序列Landsat数据的科尔沁沙地土地利用演变分析[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8672−8682. [Wu Yajuan, Liu Tingxi, Tong Xin, et al. Dynamic evolution of land use (land cover) in Horqin Sandy Land based on long time series Landsat data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8672−8682.]

[18] 吴加敏, 蔡创创, 孙灏, 等. 宁夏沿黄城市带植被覆盖时空演变及其驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 696−705. [Wu Jiamin, Cai Chuangchuang, Sunhao, et al. Spatiotemporal evolution and driving forces analysis of fractional vegetation coverage over the urban belt along the Yellow River in Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 696−705.]

[19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017,

72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[20] Wang Jinfeng, Zhang Tonglin, Fu Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.

[21] 申元村, 程维明. 生态地貌学研究体系及其功能提升探讨[J]. 地理研究, 2019, 38(2): 348-356. [Shen Yuancun, Cheng Weiming. Research system and function promotion of ecological geomorphology [J]. Geographical Research, 2019, 38(2): 348-356.]

[22] 徐平. 察布查尔县河滨湿地次生林生态旅游开发和示范[J]. 中共伊犁州委党校学报, 2014, 12(2): 40-42. [Xu Ping. Eco-tourism development and demonstration of riverside wetland secondary forest in Qapqal County[J]. Journal of Ili Prefecture Communist Party Institute, 2014, 12(2): 40-42.]

[23] 李国华. 伊犁州退耕还林后续产业的发展探讨[J]. 新疆林业, 2010, 36(5): 12-14. [Li Guohua. Discussion on the development of follow-up industry of returning farmland to forest in Ili Prefecture[J]. Forestry of Xinjiang, 2010, 36(5): 12-14.]

[24] 段红腾, 吴发启, 杨一凡, 等. 近10年巴音河流域土地利用变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 172-177. [Duan Hongteng, Wu Faqi, Yang Yifan, et al. Land use change and driving force analysis of Bayin River Basin in past 10 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 172-177.]

[25] 马艳. 伊犁河谷地西部区域土地利用变化及驱动力研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2011. [Ma Yan. The Land Use Change and The Driving Forces of Ili River Valley[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2011.]

[26] 尤全刚. 高寒草甸水热过程及其对草地退化和气候变暖的响应与反馈[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. [You Quangang. Hydrothermal Process of Alpine Meadow and its Response and Feedback to Grassland Degradation and Climate Warming [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.]

[27] 谢余初, 张影, 钱大文, 等. 基于参与式调查与主成分分析的金塔绿洲变化驱动力分[J]. 地理科学, 2016, 36 (2): 312-320. [Xie Yuchu, Zhang Ying, Qian Dawen, et al. Driving forces of Jinta Oasis change based on participatory survey and principal component analysis[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(2): 312-320.]

[28] 李万年, 曹月娥, 张婷婷. 基于GIS的伊犁河谷2000—2010年土地利用的动态变化[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(20): 3853-3858. [Li Wannian, Cao Yue'e, Zhang Tingting. Dynamic change of land use in Ili River Valley in 2000 to 2010 based on GIS[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(20): 3853-3858.]

[29] 闫俊杰, 刘海军, 崔东, 等. 近15年新疆伊犁河谷草地退化时空变化特征[J]. 草业科学, 2018, 35(3): 508-520. [Yan Junjie, Liu Haijun, Cui Dong, et al. Spatiotemporal of dynamics of grassland degradation in Ili Valley of Xinjiang over the last 15 years[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(3): 508-520.]

[30] 伊犁新闻网. 伊犁州举绿色大旗享生态文明红利[EB/OL]. http://www.xjyl.gov.cn/info/1041/113887.html. 2017-03-27. [Ili News Network. Ili Prefecture Holds Green Flag and Enjoys Ecological Civilization Dividend [EB/OL]. http: //www. xjyl. gov. cn/info/1041/113887. html. 2017-03-27.]

[31] 颜瑜严, 杨辽, 王伟胜, 等. 伊犁河谷景观生态风险时空变化及其地形梯度分析[J]. 生态科学, 2020, 39(4): 125-136. [Yan Yuyan, Yang Liao, Wang Weisheng, et al. Analysis of spatial-temporal variation of landscape ecological risk and its terrain gradient analysis in Ili River Valley[J]. Ecological Science, 2020, 39(4): 125-136.]

Analysis of land vegetation cover evolution and driving forces in the western part of the Ili River Valley

WEN Guangchao, ZHAO Meijuan, XIE Hongbo, ZHANG Yi, ZHANG Juan
(Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: Sixteen satellite-image data of the study area were selected from 2001 to 2016 as the data source to reveal the driving factors of land vegetation cover evolution in the western part of the Ili River Valley. Based on "3S" technology, image classification, superposition analysis, statistical analysis, and other methods were used to analyze the spatiotemporal evolution of land vegetation cover in the study area. A geographical detector model was also used to explore the main driving force of land use and vegetation cover evolution quantitatively. The results showed that in the past 16 years, the total area of bare land, grassland, woodland, and cultivated land accounts for 87% of the total area, which constituted the basic regional land-use pattern. Construction land continued to increase, and the area of glacier, sandy land, and water continued to decrease. In the past 16 years, the vegetation in the study area steadily evolved. The area of low vegetation coverage decreased by approximately 1333 km^2, and the area of high vegetation coverage increased by 1020 km^2. Overall, the vegetation cover changed from low and medium level to high and high level. The evolution of land vegetation cover in the study area was affected by both natural and human factors. Rainfall, temperature, population, GDP, and elevation were the main factors of evolution. Besides, some factors had significant differences in land cover, and there is a two-factor synergistic enhancement phenomenon. Meteorological factors were the primary driving force of regional land vegetation cover evolution, and human activities were the secondary driving force.

Keywords: evolution; driving factor; land use type; vegetation cover; geographical detector; western Ili River Valley